

УДК 621.321

Разработка моделей электромеханического магнито реологического демпфирующего устройства с учетом взаимного влияния физических полей

С.А. Нестеров
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: elmash@em.ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Электромеханические магнито жидкостные демпферы с регулируемой жесткостью начинают находить практическое применение, но вопрос об адекватной расчетной методике, позволяющей предварительно оценить свойства магнито жидкостного демпфирующего устройства, до конца не решен. Используемые в настоящее время методики основаны на описании магнитной жидкости моделью Бингама. Недостатком такого подхода является отсутствие учета начального участка реологической кривой магнитной жидкости, что дает неверные результаты при малых градиентах течения магнитной жидкости в зазоре демпфера. Недостатком аналитических моделей является привязка уравнений к определенному типу конструктивного исполнения рабочей зоны электромеханических магнито жидкостных демпферов и невозможность получения точного решения для каналов сложной формы. В связи с этим необходима разработка и совершенствование моделей электромеханических магнито жидкостных демпферов с учетом взаимного влияния физических полей.

Материалы и методы: Исследования проведены на основе теорий магнито гидродинамики, реологии неньютоновских жидкостей, электромагнитного поля. Использовано взаимосвязанное конечно-элементное моделирование электромагнитного, гидродинамического и температурного полей электромеханического магнито жидкостного демпфера.

Результаты: Предложен оригинальный алгоритм расчета силовой характеристики электромеханического магнито реологического демпфера с учетом реальных магнито реологических свойств магнитной жидкости, нелинейно зависящих от градиента скорости сдвигового течения и параметров магнитного поля. Нелинейные магнито реологические характеристики магнитной жидкости разбиваются на несколько участков с постоянной вязкостью. Разработана конечно-элементная модель, позволяющая проводить анализ электромеханического магнито реологического демпфера с учетом взаимного влияния электромагнитных, гидродинамических и тепловых полей.

Выводы: Предложенные развитые расчетные модели электромеханического магнито реологического демпфера и алгоритмы расчета позволяют корректно определять жесткость, силу сопротивления и выполненную работу ЭМЖД. Подход, основанный на разбиении реологической кривой магнитной жидкости на два участка с различными вязкостями, позволяет говорить о результатах, более приближенных к реальным и менее зависящим от величины градиента сдвига в зазоре магнито жидкостного демпфера. Результаты модельного аналитического решения подтверждаются результатами расчета конечно-элементного моделирования, что позволяет использовать развитую аналитическую расчетную модель электромеханического магнито реологического демпфера при проектировании вновь создаваемых демпферов.

Ключевые слова: магнитная жидкость, электромеханический магнито жидкостный демпфер, вязкость, силовая характеристика, конечно-элементная модель.

Development of models of the electromechanical magnetorheological fluid damping device with account for mutual influence of physical fields

S.A. Nesterov
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation,
E-mail: elmash@em.ispu.ru

Abstract

Background: The magnetorheological fluid dampers with adjustable stiffness are currently finding their practical applications but the problem of obtaining an adequate simplified calculation procedure for predicting the properties of magnetorheological fluid damping device is not fully resolved. The methods used now describe the magnetic fluid based on the Bingham model. The disadvantage of this approach is that it does not account for the flow curve magnetic fluid initial section, which leads to incorrect results at low rates of magnetic fluid flow in the damper gap. The disadvantage of the analytical models is that the equations refer to certain types of operating area design of the magnetorheological fluid damping device and it is impossible to reach the desired accuracy for the channels of complex shape. The aim of this work is to develop and improve the models of the electromechanical magnetorheological fluid damper taking into account the mutual influence of physical fields.

Materials and methods: The studies were based on the theories of magnetohydrodynamics, rheology of non-Newtonian fluids, electromagnetic field. We used interrelated finite-element modeling of electromagnetic, hydrodynamic and temperature fields of the electromechanical magnetic fluid damper.

Results: A new algorithm has been proposed for analytical calculation of the force-velocity relationship of magnetorheological (MR) dampers taking into account the rheological properties of the MR fluid that is nonlinearly

dependent on shear flow rate and magnetic field parameters. The nonlinear magnetorheological fluid characteristics are divided into several areas with constant viscosities. A finite element model of the MR damper has been developed; it allows analyzing the MR damper with an account for the mutual influence of electromagnetic, hydrodynamic and thermal fields.

Conclusions: The proposed calculation models and algorithms of the electromechanical magnetorheological damper can be used to assess the stiffness, resistance and force generated by the damper devices with magnetorheological fluid. The approach based on splitting the magnetic fluid flow curve into two sections with different viscosities allows us to say that the obtained results are more real and less dependent on the value of the shear rate in the magnetorheological fluid damper gap. The results of the finite element simulation coincide with the analytical solutions, which allows using them for designing MR dampers.

Key words: magnetorheological fluid, electromechanical magnetorheological fluid damper, viscosity, force-velocity relationship, finite element model.

DOI: 10.17588/2072-2672.2017.3.048-053

Введение. Силовая характеристика является основной характеристикой гидравлических демпфирующих устройств и представляет собой зависимость силы сопротивления демпфера от скорости движения поршня и обуславливается режимом течения рабочей жидкости. Методы определения силовой характеристики демпферов с классическими рабочими жидкостями оказались неприменимы к электромеханическим магнито-реологическим демпфирующим устройствам (ЭМЖД). В [1] отмечен ламинарный режим течения магнито-реологической жидкости (МЖ) в зазорах демпфирующих устройств¹. Это связано с большой вязкостью используемой МЖ и стабилизирующим влиянием внешнего магнитного поля. В настоящее время наибольшее распространение получили аналитические методы расчета силовой характеристики ЭМЖД, основанные на представлении МЖ вязкопластичным телом, описываемым уравнениями Бингама или Herschel-Bulkley [2–5]. Но эти подходы не учитывают начальный участок нелинейной реологической кривой МЖ, что приводит к некорректным результатам при малых скоростях сдвига текущей в зазоре МЖ. При знакопеременных колебаниях поршня скорость сдвига МЖ в зазоре ЭМЖД изменяет свою величину от положительного максимального значения до нуля и далее до отрицательного максимального значения, поэтому при расчетах необходимо учитывать начальный участок реологической кривой МЖ.

В ЭМЖД магнитные, гидродинамические и тепловые процессы протекают одновременно и являются взаимозависимыми. Недостатком аналитических моделей является привязка используемых уравнений к определенному типу рабочей зоны демпфера и невозможность получения точного решения для каналов сложной формы. Применение конечно-элементного моделирования является одним из лучших способов для оценки свойств ЭМЖД и поиска новых технических решений. В настоящее время наибольшее распространение в конечно-элементном моделировании магнито-жидкостных устройств получили

работы, посвященные численному расчету электромагнитного поля и экспорту получаемых результатов для гидродинамического расчета [6–8]. Однако практически отсутствуют исследования, посвященные комплексному конечно-элементному анализу физических полей в ЭМЖД с учетом их взаимного влияния.

Таким образом, развитие адекватных моделей и методов расчета ЭМЖД, основанных на анализе течения МЖ в рабочем зазоре, является актуальной задачей.

Методы моделирования и исследования. Для расчета силовой характеристики ЭМЖД используется разбиение нелинейной реологической кривой МЖ несколькими линеаризованными участками. Области с постоянной вязкостью для каждого линеаризованного участка выделены в профиле скорости потока МЖ. Осуществляется обоснование границ течения с разными вязкостями.

Геометрия демпфирующего устройства, применяемая для аналитических расчетов и конечно-элементного анализа, представлена на рис. 1. Для аналитических расчетов зазор демпфера принимается в виде плоской щели, что соответствует значению зазора, много меньшего, чем диаметр поршня.

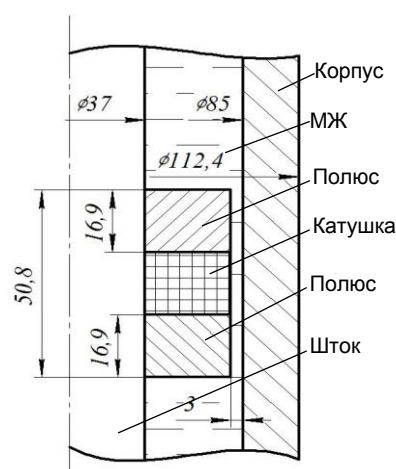


Рис. 1. Геометрия ЭМЖД

Рассмотрим течение МЖ в канале во внешнем магнитном поле. Вектор напряженности

¹ Yang G. Large-scale magnetorheological fluid damper for vibration mitigation: modeling, testing and control: PhD thesis. – Notre Dame, Indiana, 2001. – 480 p.

магнитного поля H перпендикулярен направлению течения жидкости. Профиль поля скоростей напорного течения вязкой жидкости имеет вид параболы и описывается уравнением [9]

$$v = [C/2\eta](R^2 - r^2), \quad (1)$$

где $C = \Delta p/L$; Δp – перепад давления; L – длина канала; $2R$ – толщина канала; η – вязкость жидкости; r – текущая координата.

Реологическая характеристика – это зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига слоев среды. Принципиальный вид реологической характеристики для МЖ, находящейся под действием внешнего магнитного поля, показан на рис. 2. Профиль поля скоростей, получаемый при разбиении реологической характеристики МЖ на две области, представлен на рис. 3.

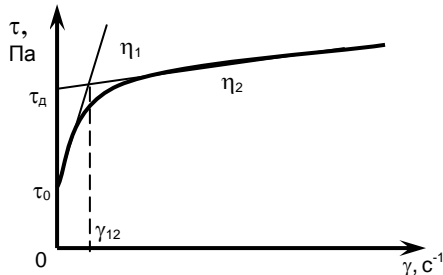


Рис. 2. Реологическая характеристика МЖ, находящейся под действием магнитного поля

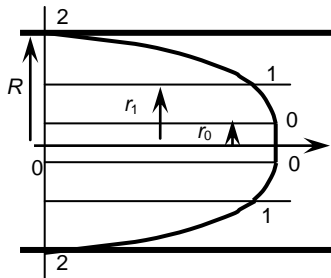


Рис. 3. Профиль скорости течения жидкости с изменяющейся динамической вязкостью

Напряжение сдвига в областях с вязкостью η_1 и η_2 при течении МЖ описывается уравнениями

$$\tau = \tau_0 + \eta_1 \gamma, \quad (2)$$

$$\tau = \tau_d + \eta_2 \gamma.$$

Из уравнений (2) можно выразить предельное значение скорости сдвига для перехода течения с вязкостью η_1 к вязкости η_2 :

$$\gamma_{12} = (\tau_d - \tau_0) / (\eta_1 - \eta_2). \quad (3)$$

Известно, что $\tau = \eta \gamma$, следовательно, начальное напряжение сдвига τ_0 определится градиентом сдвига текущей среды и будет достигнуто на координате r_0 :

$$\tau_0 = \eta_1 \left. \frac{dv}{dr} \right|_{r=r_0} = \eta_1 \frac{C}{\eta_1} r_0 = C r_0. \quad (4)$$

Размер области с постоянной скоростью течения из-за структурирования среды определен соотношением (4). Поле скоростей и градиент сдвига относительно ядра течения изменяются до градиента скорости сдвига γ_{12} согласно

формуле (1). При равенстве скоростей сдвига соседних участков γ_{12} радиус перехода к потоку с меньшей вязкостью рассчитывается по формуле

$$r_1 = r_0(1+k), \quad (5)$$

где $k = [(\tau_d/\tau_0) - 1] / [1 - (\eta_2/\eta_1)]$.

В области 1–2 поле скоростей определяется вязкостью η_2 и может быть получено по формуле (1) при изменении параметра r в диапазоне от R до r_1 :

$$v_{12} = [C/2\eta_2](R^2 - r^2) \quad R \geq r \geq r_1. \quad (6)$$

Скорость потока в области 0–1 определится как

$$v_{01} = [C/2\eta_2](R^2 - r_1^2) + [C/2\eta_1](r_1^2 - r^2) \quad (7)$$

для $r_1 \geq r \geq r_0$.

Скорость потока в области 0-0

$$v_{00} = [C/2\eta_2](R^2 - r_1^2) + [C/2\eta_1](r_1^2 - r_0^2). \quad (8)$$

Тормозящий эффект магнитного поля уменьшает получаемый через зазор расход МЖ, зависящий от средней скорости течения. Поток МЖ в канале имеет три области, в которых следует определить среднюю скорость и расход. В каждой области средняя скорость определяется начальной скоростью течения, равной конечной скорости на предыдущем участке, и средней скоростью на данном участке. Если $r_i > r$, то средняя скорость определяется как

$$v_{cp} = \frac{1}{r_i - r_j} \int_{r_j}^{r_i} v_{ij} dr = \frac{1}{r_i - r_j} \int_{r_j}^{r_i} \frac{C}{2\eta_{ij}} (r_i^2 - r^2) dr = \frac{C(r_i - r_j)(2r_i + r_j)}{6\eta_{ij}}. \quad (9)$$

Результирующий расход МЖ находим как сумму расходов каждой области, где b – это ширина канала:

$$Q_{\Sigma} = \frac{C(R - r_1)(2R + r_1)}{6\eta_2} 2b(R - r_1) + \left[\frac{C}{2\eta_2}(R^2 - r_1^2) + \frac{C(r_1 - r_0)(2r_1 + r_0)}{6\eta_1} \right] \times \times 2b(r_1 - r_0) + \left[\frac{CR^2}{2\eta_2}(R^2 - r_1^2) + \frac{C}{2\eta_1}(r_1^2 - r_0^2) \right] 2br_0. \quad (10)$$

После преобразований получим

$$Q_{\Sigma} = [2Cb(R^3\eta_1 - r_0^3\eta_2 - r_1^3\eta_1 + r_1^3\eta_2)] / [3\eta_1\eta_2]. \quad (11)$$

Область диссипации энергии в демпфере представляет собой чередующиеся участки с магнитным полем и без него (полюсы и межполюсное пространство). Сложностью аналитического расчета силовой характеристики является то, что профиль скорости течения в каждой из этих областей различен. Предлагаемый алгоритм аналитического расчета силовой характеристики ЭМЖД представлен в [10].

Для анализа ЭМЖЛ сложных конструкций разработана комплексная конечно-элементная

модель, включающая расчет электромагнитного, гидродинамического и термодинамического полей с учетом их взаимного влияния.

При конечно-элементном моделировании взаимное влияние физических полей (электромагнитных, гидродинамических, тепловых) в ЭМЖД учитывается в виде обратных связей, которые схематически представлены на рис. 4.

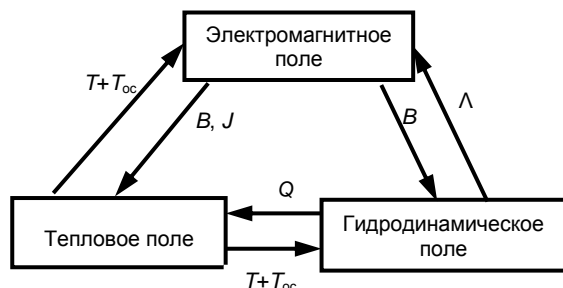


Рис. 4. Взаимное влияние физических полей в ЭМЖД: T_{oc} – температура окружающей среды; T – превышение температуры над T_{oc} ; Q – тепловой поток; B – индукция магнитного поля; J – плотность тока; Λ – проводимость путей прохождения магнитного потока

Для расчета электромагнитного поля использовались уравнения Максвелла. Так как частота колебаний демпфера относительно мала, то наведенные в массивных токопроводящих элементах вихревые токи не учитывались. Магнитная проницаемость корпуса, штока, поршня и МЖ задавалась соответствующими кривыми намагничивания. Гидродинамический расчет основан на решении уравнений Навье-Стокса для поля скоростей и давления. Задача сопряженного теплообмена решается как в области МЖ, так и во всех элементах демпфера. В МЖ теплообмен осуществляется путем конвекции и теплопроводности. В твердых телах передача тепла осуществляется только за счет теплопроводности. Поле температур непрерывно при переходе от МЖ к элементам корпуса. Выделение тепла происходит из-за вязкостного нагрева МЖ при протекании ее через зазор.

Нелинейная вязкость МЖ описана уравнением Carreau, рекомендуемым для жидкостей с сильной нелинейной зависимостью вязкости от скорости сдвига:

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) \left[1 + (K_1 \dot{\gamma})^2 \right]^{(n-1)/2}, \quad (12)$$

где η_{∞} – динамическая вязкость жидкости при бесконечно большой скорости сдвига, наименьшая вязкость; η_0 – динамическая вязкость жидкости при малой скорости сдвига, максимальная вязкость коллоида; K_1 – временная постоянная; n – показатель степени; $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига.

Для задания свойств жидкости в гидродинамическом расчете было использовано семейство реологических кривых, полученных К.Н. Gudmundsson². Реологические кривые были

сняты для случая перпендикулярной ориентации вектора напряженности магнитного поля и направления течения МЖ, что в первом приближении можно считать соответствующим взаимной ориентации векторов напряженности и течений в реальных ЭМЖД. Временная постоянная K_1 , динамическая вязкость жидкости при бесконечно большой η_{∞} и малой η_0 скоростях сдвига принимались зависящими от индукции магнитного поля. Показатель степени n равен 0,02. На рис. 5 точками показаны экспериментально полученные данные, линиями – результаты математической аппроксимации.

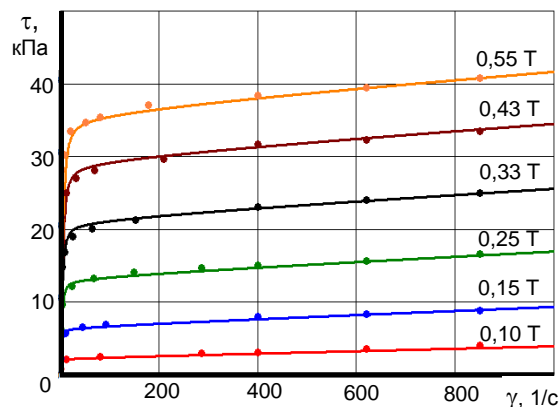


Рис. 5. Реологические зависимости МЖ для разных индукций магнитного поля и их математическая аппроксимация

Вязкость МЖ имеет ярко выраженную температурную зависимость. На основе анализа работы [11] выведена формула, учитывающая изменение вязкости МЖ при изменении температуры:

$$\eta_T = \eta_{20} \left(1 - C_T \left[\frac{T - 293}{293} \right] \right), \quad (13)$$

где η_{20} – динамическая вязкость МЖ при $T = 293$ К; C_T – температурный коэффициент (здесь $C_T = 1,9$); T – температура МЖ.

Поле температуры непрерывно при переходе от МЖ к твердым элементам демпфера. Нагрев происходит за счет вязкостных потерь при дросселировании МЖ через зазор и омических потерь в катушке.

Результаты исследования. На рис. 6 приведено сравнение силовых характеристик ЭМЖД, полученных в результате аналитического расчета и конечно-элементного моделирования. Кривая 1 – силовая характеристика ЭМЖД, рассчитанная по общеизвестной методике, основанной на представлении МЖ идеальной бингамовской жидкостью. Кривая 2 рассчитана аналитическим методом, основанным на разбиении реологической кривой МЖ на два линеаризованных участка с различными вязкостями. Кривая 3 получена по результатам конечно-элементного моделирования.

² Gudmundsson K.H. Design of a Magnetorheological Fluid for an MR Prosthetic Knee Actuator with an Optimal Geometry: PhD

thesis // Faculty of industrial engineering, University of Iceland, 2011. – 112 p. ISBN 978-9979-9935-5-1

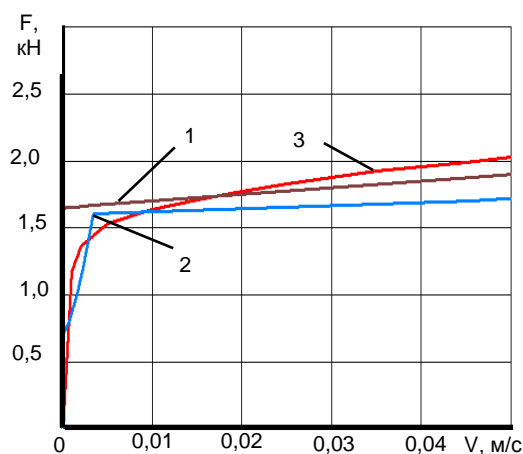


Рис. 6. Сила сопротивления ЭМЖД при индукции под полюсом 0,25 Т

На рис. 7 показано изменение максимальной силы сопротивления ЭМЖД при гармоническом колебании амплитудой 120 мм и частотой 2,5 Гц. Линия 1 на рис. 7 соответствует силе сопротивления без учета влияния температуры на вязкость МЖ, линия 2 – силе сопротивления демпфера с учетом влияния температуры на вязкость МЖ.

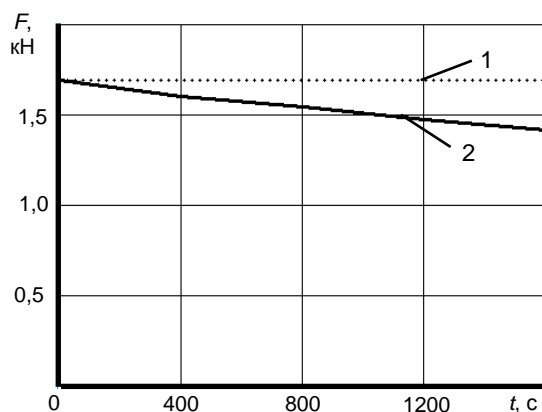


Рис. 7. Сила сопротивления ЭМЖД при индукции под полюсом 0,25 Т с учетом (2) и без учета (1) изменения температуры и вязкости МЖ

При малой скорости движения поршня метод расчета силовой характеристики с разделением реологической кривой МЖ на несколько линеаризованных участков дает лучшее совпадение с результатами конечно-элементного моделирования (рис. 6). Конечно-элементная модель не учитывает критического напряжения сдвига МЖ, тем не менее использование уравнения Carreau для описания вязкости МЖ достаточно быстро выводит силовую характеристику ЭМЖД в область физически обоснованных значений. При больших скоростях разница между результатами конечно-элементного моделирования и аналитических решений не превышает 15 % и связана с наличием магнитного поля в межполюсном пространстве, что не учитывается в аналитических моделях. Все модели показывают схожие результаты при большой скорости

движения поршня. Предложенные развитые расчетные модели дают вид начального участка силовой характеристики, совпадающий с получаемым в результате экспериментального исследования ЭМЖД³ [14, 15].

Сила сопротивления демпфера уменьшается при снижении вязкости МЖ. Во время работы ЭМЖД магнитная жидкость нагревается, меняются вязкость и гидродинамическое сопротивление. Так, после 40 мин работы сила сопротивления демпфера уменьшается на 16,5 % (рис. 7).

Выводы. Предложенные развитые расчетные модели электромеханического магнитореологического демпфера и алгоритмы расчета позволяют корректно определять жесткость, силу сопротивления и выполненную работу ЭМЖД с корректным учетом свойств магнитной жидкости, нелинейно зависящих от градиента скорости сдвигового течения и параметров магнитного поля.

Результаты модельного аналитического решения подтверждаются результатами расчета конечно-элементного моделирования, что позволяет использовать развитую аналитическую расчетную модель электромеханического магнитореологического демпфера при проектировании вновь создаваемых демпферов.

Разработанная конечно-элементная модель ЭМЖД позволяет проводить анализ физических процессов с учетом взаимного влияния электромагнитных, гидродинамических и тепловых полей.

Список литературы

1. Шульман З.П., Кордонский В.И. Магнитореологический эффект. – Минск: Наука и техника, 1982. – 184 с.
2. Ghiță G., Giuclea M., Sireteanu T. Modelling of dynamic behavior of magnetorheological fluid damper by genetic algorithms based inverse method // The 6th International Conference on Hydraulic Machinery and Hydrodynamics. – Timisoara, Romania, October 21–22, 2004. – P. 619–628.
3. Case D., Taheri B., Richer E. Dynamic Magnetorheological Damper for Orthotic Tremor Suppression // HUIIC Mathematics & Engineering, 2011 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://huichawaii.org/assets/richer,-edmond-1.pdf>, свободный.
4. Bilvk V.A., Korobko E.V., Kuzmin V.A. Simulation of Performance Characteristics of a Magnetorheological Shock-Absorber at the Dependence of Rheological Properties from the Magnetic Field // Vibroengineering. Vibroengineering Procedia. – 2013. – Vol. 1. – P. 19–22.
5. Кубич В.И., Ядчишин Ю.В. К вопросу построения рабочей характеристики амортизатора с магнитореологической жидкостью // Вестник КДПУ имени Михаила Остроградского. – 2009. – Вып. 4., ч. 2. – С. 87–90.
6. Modeling And Simulation of MR Damper Using COMSOL / Y.M. Khedkar, S.B. Joshi, P.M. Pawar, B.P. Ronge // Excerpt from the Proceedings of the 2014 COMSOL Conference in Bangalore [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.comsol.com/paper/download/213151/rymkhedkar_paper.pdf, свободный.

³ Simon D.E. An Investigation of the Effectiveness of Skyhook Suspensions for Controlling Roll Dynamics of Sport Utility Vehicles Using Magneto-Rheological Dampers: PhD thesis. – Blacksburg, Virginia, 2001. – 229 p.; Рандин Д.Г. Электротехническая активная система виброзащиты с магнитореологическим демпфером: дис. ... канд. техн наук: 05.09.03. – Самара, 2016. – 133 с.

7. Benetti M., Dragoni E. Nonlinear Magnetic Analysis of Multi-plate Magnetorheological Brakes and Clutches // EExcerpt from the Proceedings of the COMSOL Users Conference 2006 Milano [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/266095018_Nonlinear_Magnetic_Analysis_of_Multi-plate_Magnetorheological_Brakes_and_Clutches, свободный.

8. Sternberg A., Zemp R., Llera J.C. Multiphysics behavior of a magneto-rheological damper and experimental validation // Engineering Structures. – 2014. – Vol. 69. – P. 194–205.

9. Тарг С.М. Основные задачи теории ламинарных течений. – М.; Л.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1951. – 420 с.

10. Казаков Ю.Б., Морозов Н.А., Нестеров С.А. Расчетный анализ силовой характеристики электромеханического магнитожидкостного демпфера // Вестник ИГЭУ. – 2015. – Вып. 4. – С. 17–22.

11. Guerrero-Sanchez C., Ortiz-Alvarado A., Schubert U.S. Temperature effect on the magneto-rheological behavior of magnetite particles dispersed in an ionic liquid // Journal of Physics: Conference Series. – 2009. – Vol. 149. doi:10.1088/1742-6596/149/1/012052.

References

1. Shulman, Z.P., Kordonsky, V.I. *Magnitoreologicheskiiy effekt* [Magnetorheological effect]. Minsk, Nauka i tekhnika, 1982. 184 p.

2. Ghiță, G., Giuclea, M., Sireteanu, T. Modelling of dynamic behavior of magnetorheological fluid damper by genetic algorithms based inverse method. The 6th International Conference on Hydraulic Machinery and Hydrodynamics. Timisoara, Romania, October 21–22, 2004, pp. 619–628.

3. Case, D., Taheri, V., Richer, E. Dynamic Magnetorheological Damper for Orthotic Tremor Suppression. HUIC Mathematics & Engineering, 2011. Available at: <http://huichawaii.org/assets/richer,-edmond-1.pdf>, svobodnyy.

4. Bilvk, V.A., Korobko, E.V., Kuzmin, V.A. Simulation of Performance Characteristics of a Magnetorheological Shock-Absorber at the Dependence of Rheological Properties from the Magnetic Field. *Vibroengineering. Vibroengineering Procedia*, 2013, vol. 1, pp. 19–22.

5. Kubich, V.I., Yadchishin, Yu.V. K voprosu postroeniya rabochey kharakteristiki amortizatora s magnitoreologicheskoy zhidkost'yu [On building the operating characteristic of the magnetorheological fluid damper]. *Vestnik KDPU imeni Mikhaila Ostrogradskogo*, 2009, issue 4, part 2, pp. 87–90.

6. Khedkar, Y.M., Joshi, S.B., Pawar, P.M., Ronge, B.P. Modeling And Simulation of MR Damper Using COMSOL. Excerpt from the Proceedings of the 2014 COMSOL Conference in Bangalore. Available at: https://www.comsol.com/paper/download/213151/rymkhedkar_paper.pdf

7. Benetti, M., Dragoni, E. Nonlinear Magnetic Analysis of Multi-plate Magnetorheological Brakes and Clutches. EExcerpt from the Proceedings of the COMSOL Users Conference 2006 Milano. Available at: https://www.researchgate.net/publication/266095018_Nonlinear_Magnetic_Analysis_of_Multi-plate_Magnetorheological_Brakes_and_Clutches

8. Sternberg, A., Zemp, R., Llera, J.C. Multiphysics behavior of a magneto-rheological damper and experimental validation. *Engineering Structures*, 2014, vol. 69, pp. 194–205.

9. Targ, S.M. *Osnovnye zadachi teorii laminarnykh techeniy* [The main problems of laminar flow theory]. Moscow; Leningrad, Gosudarstvennoe izdatel'stvo tekhniko-teoreticheskoy literatury, 1951. 420 p.

10. Kazakov, Yu.B., Morozov, N.A., Nesterov, S.A. Raschetnyy analiz silovoy kharakteristiki elektromekhanicheskogo magnitozhidkostnogo dempfera [Calculation of force-velocity relationship of electromechanical magnetorheological fluid damper]. *Vestnik IGEU*, 2015, issue 4, pp. 17–22.

11. Guerrero-Sanchez, C., Ortiz-Alvarado, A., Schubert, U.S. Temperature effect on the magnetorheological behavior of magnetite particles dispersed in an ionic liquid. *Journal of Physics: Conference Series*, 2009, vol. 149. doi:10.1088/1742-6596/149/1/012052.

Нестеров Сергей Александрович,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант кафедры электромеханики,
телефон (4932) 26-97-15.

Nesterov Sergei Aleksandrovich,

Ivanovo State Power Engineering University,
Post-graduate student of the Electromechanics Department,
telephone (4932) 26-97-15.